

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号  
特開2002-156669

(P 2 0 0 2 - 1 5 6 6 6 9 A)

(43) 公開日 平成14年 5 月31日 (2002. 5. 31)

(51) Int. Cl.  
G02F 1/37

識別記号

F I  
G02F 1/37

テームコード (参考)  
2K002

審査請求 未請求 請求項の数12 O L (全17頁)

(21) 出願番号 特願2001-275587 (P 2001-275587)  
(22) 出願日 平成13年 9 月11日 (2001. 9. 11)  
(31) 優先権主張番号 特願2000-275496 (P2000-275496)  
(32) 優先日 平成12年 9 月11日 (2000. 9. 11)  
(33) 優先権主張国 日本 (J P)

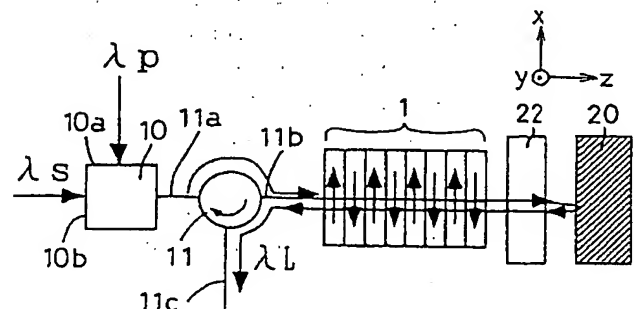
(71) 出願人 000005887  
三井化学株式会社  
東京都千代田区霞が関三丁目 2 番 5 号  
(72) 発明者 七条 司朗  
千葉県袖ヶ浦市長浦字拓二号580番32 三  
井化学株式会社内  
(72) 発明者 山田 一博  
千葉県袖ヶ浦市長浦字拓二号580番32 三  
井化学株式会社内  
(74) 代理人 100075557  
弁理士 西教 圭一郎 (外 1 名)  
F ターム (参考) 2K002 AA02 AB12 BA01 CA03 EA11  
GA01 GA04 HA04 HA19 HA31

(54) 【発明の名称】 波長変換装置

(57) 【要約】

【課題】 信号光の偏光状態に依存せず、安定した波長変換を実現できる波長変換装置を提供する。

【解決手段】 波長変換装置は、ポンプ光および信号光を合波する合波器 10 と、ポンプ光および信号光のうち x 方向の直線偏光成分について波長変換を行って x 方向に偏光した出力光を発生する波長変換素子 1 と、合波器 10 の光を波長変換素子 1 に出力し、波長変換素子 1 からの光をポート 11 c に出力する光サーキュレータ 11 と、反射ミラー 20 と、波長変換素子 1 から反射ミラー 20 に向かう光と反射ミラー 20 で反射して波長変換素子 1 に戻る光の偏光方向の差を 90 度とするファラデーローテータ 22 とを含んで構成される。出力光の強度 I は、信号光  $\lambda_s$  の入射偏光角度  $\phi$  に依存せずに一定になる。



## 【特許請求の範囲】

【請求項 1】 第 1 方向の直線偏光成分について波長変換を行う波長変換素子と、

波長変換素子を通過した光を反射させて波長変換素子に戻す反射素子を含み、波長変換素子から反射素子に向かう光と反射素子で反射して波長変換素子に戻る光の偏光方向の差が 90 度となるような偏光回転手段と備えることを特徴とする波長変換装置。

【請求項 2】 波長変換素子と偏光回転手段との間に設けられ、ポンプ光を選択的に反射するための波長選択反射素子を備えることを特徴とする請求項 1 記載の波長変換装置。

【請求項 3】 波長変換する光をビームウオークオフにより、互いに直交する 2 つの直線偏光成分に分けてそれぞれを異なる 2 つの光軸に進行させる複屈折材料からなる偏光分離素子と、

2 つの光軸を進行するそれぞれの直線偏光成分に応じて波長変換する波長変換素子と、

波長変換素子を通過した 2 つの光を合波する偏光合波素子とを備えたことを特徴とする波長変換装置。

【請求項 4】 第 1 方向の直線偏光を第 1 光軸に、第 1 方向と直交する第 2 方向の直線偏光を第 2 光軸にそれぞれ分離する偏光分離素子と、

偏光分離素子から第 2 光軸に沿って進行する光の偏光方向を 90 度回転させる第 1 の 90 度偏光回転素子と、偏光分離素子から第 1 光軸に沿って進行する光および第 1 の 90 度偏光回転素子から第 2 光軸に沿って進行する光に関して、第 1 方向の直線偏光成分について波長変換を行う波長変換素子と、

波長変換素子から第 1 光軸に沿って進行する光の偏光方向を 90 度回転させる第 2 の 90 度偏光回転素子と、第 2 の 90 度偏光回転素子から第 1 光軸に沿って進行する光および波長変換素子から第 2 光軸に沿って進行する光を合波する偏光合波素子とを備えることを特徴とする波長変換装置。

【請求項 5】 第 1 方向の直線偏光を第 1 光軸に、第 1 方向と直交する第 2 方向の直線偏光を第 2 光軸にそれぞれ分離する偏光分離素子と、

偏光分離素子から第 1 光軸に沿って進行する光に関して、第 1 方向の直線偏光成分について波長変換を行う第 1 波長変換素子と、

偏光分離素子から第 2 光軸に沿って進行する光に関して、第 2 方向の直線偏光成分について波長変換を行う第 2 波長変換素子と、

第 1 波長変換素子を通過した光および第 2 波長変換素子を通過した光を合波する偏光合波素子とを備えることを特徴とする波長変換装置。

【請求項 6】 第 1 方向の直線偏光を第 1 光軸に、第 1 方向と直交する第 2 方向の直線偏光を第 2 光軸にそれぞれ分離する偏光分離素子と、

偏光分離素子から第 2 光軸に沿って通過した光の偏光方向を 90 度回転させる 90 度偏光回転素子と、

偏光分離素子から第 1 光軸に沿って進行する光および 90 度偏光回転素子から第 2 光軸に沿って進行する光に関して、第 1 方向の直線偏光成分について波長変換を行う波長変換素子と、

波長変換素子から第 1 光軸および第 2 光軸に沿って進行する光を反射し、第 1 光軸に沿った光が波長変換素子を通過し、第 2 光軸に沿った光が波長変換素子および 90 度偏光回転素子の順で通過し、偏光分離素子において合波させるための反射素子と備えることを特徴とする波長変換装置。

【請求項 7】 第 1 方向の直線偏光を第 1 光軸に、第 1 方向と直交する第 2 方向の直線偏光を第 2 光軸にそれぞれ分離する偏光分離素子と、

偏光分離素子から第 1 光軸に沿って進行する光に関して、第 1 方向の直線偏光成分について波長変換を行う第 1 波長変換素子と、

偏光分離素子から第 2 光軸に沿って進行する光に関して、第 2 方向の直線偏光成分について波長変換を行う第 2 波長変換素子と、

第 1 波長変換素子から第 1 光軸に沿って進行する光および第 2 波長変換素子から第 2 光軸に沿って進行する光を反射し、第 1 波長変換素子を通過した光および第 2 波長変換素子を通過した光を偏光分離素子において合波させるための反射素子と備えることを特徴とする波長変換装置。

【請求項 8】 第 1 方向の直線偏光を第 1 光軸に、第 1 方向と直交する第 2 方向の直線偏光を第 2 光軸にそれぞれ分離する偏光分離素子と、

偏光分離素子から第 1 光軸に沿って進行する光に関して、第 1 方向の直線偏光成分について波長変換を行う波長変換素子と、

波長変換素子から第 1 光軸に沿って進行する光および偏光分離素子から第 2 光軸に沿って進行する光を合波する偏光合波素子と、

偏光合波素子を通過した光を反射させて波長変換素子に戻す反射素子を含み、波長変換素子から反射素子に向かう光と反射素子で反射して波長変換素子に戻る光の偏光方向の差が 90 度となるような偏光回転手段と備えることを特徴とする波長変換装置。

【請求項 9】 第 1 方向の直線偏光を第 1 光軸に、第 1 方向と直交する第 2 方向の直線偏光を第 2 光軸にそれぞれ分離する偏光分離素子と、

偏光分離素子から第 2 光軸に沿って進行する光の偏光方向を 90 度回転させる第 1 の 90 度偏光回転素子と、偏光分離素子から第 1 光軸に沿って進行する光および第 1 の 90 度偏光回転素子から第 2 光軸に沿って進行する光に関して、第 1 方向の直線偏光成分について波長変換を行う波長変換素子と、

波長変換素子から第1光軸に沿って進行する光の偏光方向を90度回転させる第2の90度偏光回転素子と、第2の90度偏光回転素子から第1光軸に沿って進行する光および波長変換素子から第2光軸に沿って進行する光を合波する偏光合波素子と、

偏光合波素子を通過した光を反射させて波長変換素子に戻す反射素子を含み、波長変換素子から反射素子に向かう光と反射素子で反射して波長変換素子に戻る光の偏光方向の差が90度となるような偏光回転手段と備えることを特徴とする波長変換装置。

【請求項10】 第1方向の直線偏光を第1光軸に、第1方向と直交する第2方向の直線偏光を第2光軸にそれぞれ分離する偏光分離素子と、

偏光分離素子から第1光軸に沿って進行する光に関して、第1方向の直線偏光成分について波長変換を行う第1波長変換素子と、

偏光分離素子から第2光軸に沿って進行する光に関して、第2方向の直線偏光成分について波長変換を行う第2波長変換素子と、

第1波長変換素子から第1光軸に沿って進行する光および第2波長変換素子から第2光軸に沿って進行する光を合波する偏光合波素子と、

偏光合波素子を通過した光を反射させて波長変換素子に戻す反射素子を含み、波長変換素子から反射素子に向かう光と反射素子で反射して波長変換素子に戻る光の偏光方向の差が90度となるような偏光回転手段と備えることを特徴とする波長変換装置。

【請求項11】 前記偏光回転手段が光の偏光方向を45度回転させる45度回転素子と、45度偏光回転素子を通過した光を反射し、45度回転素子へ戻すための前記反転素子から成り、前記45度回転素子が前記波長変換素子と前記反射素子の間に設けられたことを特徴とする請求項1、2、8、9、10のいずれかに記載の波長変換装置。

【請求項12】 前記偏光回転手段が、前記反射素子と前記波長変換素子の間に設けられた $\lambda/4$ 板と前記反射素子とから成ることを特徴とする請求項1、2、8、9、10のいずれかに記載の波長変換装置。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、入力光の波長を別の波長を持つ光に変換できる波長変換装置に関する。

【0002】

【従来の技術】光ファイバを用いた通信分野では、大容量で高速なデータ伝送が要求される。特に波長多重(WDM)や光時分割多重(OTDM)は光ファイバの伝送容量を格段に増加できる点で有望視されており、複数のキャリア波長を精度良く制御するための波長制御技術やあるキャリア波長を別のキャリア波長に変換する波長変換技術が重要になる。

【0003】たとえば既設の光通信ネットワークでは、光ファイバの損失が少ない1.3 $\mu$ m帯をキャリア波長とした単一波長の光伝送が主流であり、一般には都市内の電話通信網を置換する目的で敷設されている。一方、都市間を結ぶ幹線系の光通信ネットワークでは、波長多重伝送に好適な1.5 $\mu$ m帯をキャリア波長とした波長多重の光伝送が主流である。

【0004】両者の光通信ネットワークを接続する場合、キャリア波長が互いに異なるため、一方のネットワークに流れる光信号をいったん電気信号に変換し、他方のネットワークに適合するキャリア波長を用いた光信号に変換する必要がある。すると、光通信の性能が電気信号処理の能力によって制限されてしまう。

【0005】そこで、一方のネットワークのキャリア波長を他方のネットワークのキャリア波長に直接に変換できれば、電気信号処理が介在しなくなり、光通信の高い性能を有効に維持できる。そのため、キャリア波長を変換するための光ミキシング技術が不可欠となる。

【0006】こうした波長変換では、非線形光学効果による第2高調波発生(SHG)、和周波発生(SFG)、差周波発生(DFG)、パラメトリック変換、などを利用するため、非線形光学効果の高い材料が望まれる。

【0007】関連する先行技術として、特開平10-213826号、特開2000-10130号、文献(IEIC Trans. Electron. volE83-C, No6 p869 (2000))などがある。

【0008】

【発明が解決しようとする課題】非線形光学効果は、入力光の偏光状態や非線形光学材料の方位に大きく依存する。たとえば所定方向に直線偏光した光が光ファイバを通過すると、光ファイバの分散等の影響を受けるため、光ファイバの出口における偏光状態は一般に特定できない。

【0009】また非線形光学材料は、一般に偏光依存性を有するため、入力光の偏光状態がキャリア波長毎に変化すると、波長変換効率が一定せず、波長変換された出力光の強度が不安定になる。

【0010】本発明の目的は、信号光の偏光状態に依存せず、安定した波長変換を実現できる波長変換装置を提供することである。

【0011】

【課題を解決するための手段】本発明は、第1方向の直線偏光成分について波長変換を行う波長変換素子と、波長変換素子を通過した光を反射させて波長変換素子に戻す反射素子を含み、波長変換素子から反射素子に向かう光と反射素子で反射して波長変換素子に戻る光の偏光方向の差が90度となるような偏光回転手段と備えることを特徴とする波長変換装置である。

【0012】本発明に従えば、波長変換素子は第1方向

の直線偏光成分について波長変換可能な偏光依存性を有し、その後段に偏光回転手段を配置することによって、ポンプ光および信号光を入力すると、ポンプ光および信号光の第1方向成分は波長変換素子によって波長変換され、第1方向と直交する第2方向成分は波長変換されない。

【0013】次に偏光回転手段で反射すると、第1方向成分は波長変換素子の第1方向と直交するため波長変換されず、一方、第2方向成分は波長変換素子の第1方向と平行になるため波長変換される。その結果、第1方向成分は往路で波長変換され、第2方向成分は復路で波長変換されることになり、波長変換された出力光の合成強度は一定になり、信号光の偏光状態に依存せず、安定した波長変換を実現できる。

【0014】また本発明は、波長変換素子と偏光回転手段との間に設けられ、ポンプ光を選択的に反射するための波長選択反射素子を備えることを特徴とする。

【0015】本発明に従えば、波長変換素子と偏光回転手段との間にポンプ光を選択的に反射するための波長選択反射素子を設けることによって、ポンプ光および信号光を入力すると、ポンプ光および信号光の第1方向成分は波長変換素子によって波長変換され、第1方向と直交する第2方向成分は波長変換されず、次に波長選択反射素子によってポンプ光だけが波長変換素子に戻されて、信号光はそのまま通過する。

【0016】次に偏光回転手段で反射すると、再び45度偏光回転素子によって第1方向成分および第2方向成分は光軸周りに45度回転し、波長選択反射素子をそのまま通過する。すると、信号光の第1方向成分は波長変換素子の第1方向と直交するため波長変換されず、一方、信号光の第2方向成分は波長変換素子の第1方向と平行になるため波長変換され、このときポンプ光の第1方向成分が波長変換に寄与する。従って、ポンプ光の第1方向成分は往路および復路で波長変換に寄与できるため、波長変換効率がより向上し、好ましくはポンプ光として第1方向の直線偏光を使用すると、波長変換効率がより一層向上できる。

【0017】また本発明は、波長変換する光をビームウオークオフにより、互いに直交する2つの直線偏光成分に分けてそれぞれを異なる2つの光軸に進行させる複屈折材料からなる偏光分離素子と、2つの光軸を進行するそれぞれの直線偏光成分に応じて波長変換する波長変換素子と、波長変換素子を通過した2つの光を合波する偏光合波素子とを備えたことを特徴とする波長変換装置である。

【0018】本発明に従えば、ビームウオークオフによって2つの直線偏光成分に分離した後、各偏光成分毎に波長変換し、再び合成することによって、波長変換された出力光の合成強度は一定になり、入力光の偏光状態に依存せず、安定した波長変換を実現できる。

【0019】また本発明は、第1方向の直線偏光を第1光軸に、第1方向と直交する第2方向の直線偏光を第2光軸にそれぞれ分離する偏光分離素子と、偏光分離素子から第2光軸に沿って進行する光の偏光方向を90度回転させる第1の90度偏光回転素子と、偏光分離素子から第1光軸に沿って進行する光および第1の90度偏光回転素子から第2光軸に沿って進行する光に関して、第1方向の直線偏光成分について波長変換を行う波長変換素子と、波長変換素子から第1光軸に沿って進行する光の偏光方向を90度回転させる第2の90度偏光回転素子と、第2の90度偏光回転素子から第1光軸に沿って進行する光および波長変換素子から第2光軸に沿って進行する光を合波する偏光合波素子とを備えることを特徴とする波長変換装置である。

【0020】本発明に従えば、波長変換素子は第1方向の直線偏光成分について波長変換可能な偏光依存性を有し、その前段に配置された偏光分離素子にポンプ光および信号光を入力すると、偏光分離素子はポンプ光および信号光に関して第1方向の直線偏光を第1光軸に、第1方向と直交する第2方向の直線偏光を第2光軸にそれぞれ分離し、第1光軸に沿って進行するポンプ光および信号光は波長変換素子によって波長変換される。一方、第2光軸に沿って進行するポンプ光および信号光は、第1の90度偏光回転素子を通過すると偏光方向が第1方向と平行になり、波長変換素子によって波長変換される。

【0021】波長変換素子から第1光軸に沿って進行するポンプ光および信号光は、第2の90度偏光回転素子を通過すると偏光方向が第2方向と平行になって偏光合波素子に入り、一方、波長変換素子から第2光軸に沿って進行するポンプ光および信号光はそのまま偏光合波素子に入り、両光軸に沿った光が合波される。その結果、第1方向成分は第1光軸上で波長変換され、第2方向成分は第2光軸上で波長変換され、波長変換された出力光の合成強度は一定になり、信号光の偏光状態に依存せず、安定した波長変換を実現できる。

【0022】また本発明は、第1方向の直線偏光を第1光軸に、第1方向と直交する第2方向の直線偏光を第2光軸にそれぞれ分離する偏光分離素子と、偏光分離素子から第1光軸に沿って進行する光に関して、第1方向の直線偏光成分について波長変換を行う第1波長変換素子と、偏光分離素子から第2光軸に沿って進行する光に関して、第2方向の直線偏光成分について波長変換を行う第2波長変換素子と、第1波長変換素子を通過した光および第2波長変換素子を通過した光を合波する偏光合波素子とを備えることを特徴とする波長変換装置である。

【0023】本発明に従えば、第1波長変換素子は第1方向の直線偏光成分について波長変換可能な偏光依存性を有し、第2波長変換素子は第2方向の直線偏光成分について波長変換可能な偏光依存性を有し、その

前段に配置された偏光分離素子にポンプ光および信号光を入力すると、偏光分離素子はポンプ光および信号光に関して第1方向の直線偏光を第1光軸に、第1方向と直交する第2方向の直線偏光を第2光軸にそれぞれ分離し、第1光軸に沿って進行するポンプ光および信号光は第1波長変換素子によって波長変換され、第2光軸に沿って進行するポンプ光および信号光は第2波長変換素子によって波長変換される。

【0024】第1波長変換素子から第1光軸に沿って、および第2波長変換素子から第2光軸に沿ってそれぞれ進行するポンプ光および信号光は、偏光合波素子によって合波される。その結果、第1方向成分は第1波長変換素子によって波長変換され、第2方向成分は第2波長変換素子によって波長変換され、波長変換された出力光の合成強度は一定になり、信号光の偏光状態に依存せず、安定した波長変換を実現できる。

【0025】また本発明は、第1方向の直線偏光を第1光軸に、第1方向と直交する第2方向の直線偏光を第2光軸にそれぞれ分離する偏光分離素子と、偏光分離素子から第2光軸に沿って通過した光の偏光方向を90度回転させる90度偏光回転素子と、偏光分離素子から第1光軸に沿って進行する光および90度偏光回転素子から第2光軸に沿って進行する光に関して、第1方向の直線偏光成分について波長変換を行う波長変換素子と、波長変換素子から第1光軸および第2光軸に沿って進行する光を反射し、第1光軸に沿った光が波長変換素子を通過し、第2光軸に沿った光が波長変換素子および90度偏光回転素子の順で通過し、偏光分離素子において合波させるための反射素子と備えることを特徴とする波長変換装置である。

【0026】本発明に従えば、波長変換素子は第1方向の直線偏光成分について波長変換可能な偏光依存性を有し、その前段に配置された偏光分離素子にポンプ光および信号光を入力すると、偏光分離素子はポンプ光および信号光に関して第1方向の直線偏光を第1光軸に、第1方向と直交する第2方向の直線偏光を第2光軸にそれぞれ分離し、第1光軸に沿って進行するポンプ光および信号光は波長変換素子によって波長変換される。一方、第2光軸に沿って進行するポンプ光および信号光は、90度偏光回転素子を通過すると偏光方向が第1方向と平行になり、波長変換素子によって波長変換される。

【0027】波長変換素子から第1光軸および第2光軸に沿ってそれぞれ進行するポンプ光、信号光および出力光は、反射素子で反射すると、再び同じ波長変換素子を通過して波長変換される。第2光軸に沿って進行するポンプ光、信号光および出力光は90度偏光回転素子を通過すると偏光方向が第2方向と平行になって偏光分離素子に入る。両光軸に沿って進行するポンプ光、信号光および出力光は偏光分離素子によって合波される。その結

果、第1方向成分は第1光軸上で波長変換され、第2方向成分は第2光軸上で波長変換され、波長変換された出力光の合成強度は一定になり、信号光の偏光状態に依存せず、安定した波長変換を実現できる。

【0028】また本発明は、第1方向の直線偏光を第1光軸に、第1方向と直交する第2方向の直線偏光を第2光軸にそれぞれ分離する偏光分離素子と、偏光分離素子から第1光軸に沿って進行する光に関して、第1方向の直線偏光成分について波長変換を行う第1波長変換素子と、偏光分離素子から第2光軸に沿って進行する光に関して、第2方向の直線偏光成分について波長変換を行う第2波長変換素子と、第1波長変換素子から第1光軸に沿って進行する光および第2波長変換素子から第2光軸に沿って進行する光を反射し、第1波長変換素子を通過した光および第2波長変換素子を通過した光を偏光分離素子において合波させるための反射素子と備えることを特徴とする波長変換装置である。

【0029】本発明に従えば、第1波長変換素子は第1方向の直線偏光成分について波長変換可能な偏光依存性を有し、第2波長変換素子は第2方向の直線偏光成分について波長変換可能な偏光依存性を有し、その前段に配置された偏光分離素子にポンプ光および信号光を入力すると、偏光分離素子はポンプ光および信号光に関して第1方向の直線偏光を第1光軸に、第1方向と直交する第2方向の直線偏光を第2光軸にそれぞれ分離し、第1光軸に沿って進行するポンプ光および信号光は第1波長変換素子によって波長変換され、第2光軸に沿って進行するポンプ光および信号光は第2波長変換素子によって波長変換される。

【0030】波長変換素子から第1光軸および第2光軸に沿ってそれぞれ進行するポンプ光および信号光は、反射素子で反射すると、再び同じ波長変換素子をそれぞれ通過して波長変換され、さらに偏光合波素子によって合波される。その結果、第1方向成分は第1波長変換素子によって波長変換され、第2方向成分は第2波長変換素子によって波長変換され、波長変換された出力光の合成強度は一定になり、信号光の偏光状態に依存せず、安定した波長変換を実現できる。

【0031】また本発明は、第1方向の直線偏光を第1光軸に、第1方向と直交する第2方向の直線偏光を第2光軸にそれぞれ分離する偏光分離素子と、偏光分離素子から第1光軸に沿って進行する光に関して、第1方向の直線偏光成分について波長変換を行う波長変換素子と、波長変換素子から第1光軸に沿って進行する光および偏光分離素子から第2光軸に沿って進行する光を合波する偏光合波素子と、偏光合波素子を通過した光を反射させて波長変換素子に戻す反射素子を含み、波長変換素子から反射素子に向かう光と反射素子で反射して波長変換素子に戻る光の偏光方向の差が90度となるような偏光回転手段と備えることを特徴とする波長変換装置である。

【0032】本発明に従えば、波長変換素子は第1方向の直線偏光成分について波長変換可能な偏光依存性を有し、その前段に配置された偏光分離素子にポンプ光および信号光を入力すると、偏光分離素子はポンプ光および信号光に関して第1方向の直線偏光を第1光軸に、第1方向と直交する第2方向の直線偏光を第2光軸にそれぞれ分離し、第1光軸に沿って進行するポンプ光および信号光は波長変換素子によって波長変換されるが、第2光軸に沿って進行するポンプ光および信号光は波長変換されない。波長変換素子から第1光軸および第2光軸に沿ってそれぞれ進行するポンプ光および信号光は、偏光合波素子によって合波される。

【0033】次に偏光回転手段で反射すると、光の偏光方向が90度回転する。さらに偏光合波素子は、往路で第1光軸を進行したポンプ光および信号光を第2光軸に、往路で第2光軸を進行したポンプ光および信号光を第1光軸にそれぞれ分離し、第1光軸に沿った光は波長変換素子によって波長変換されるが、第2光軸に沿った光は波長変換されない。次に波長変換素子から第1光軸および第2光軸に沿ってそれぞれ進行するポンプ光および信号光は、偏光分離素子によって合波される。その結果、第1方向成分は往路で波長変換され、第2方向成分は復路で波長変換されることになり、波長変換された出力光の合成強度は一定になり、信号光の偏光状態に依存せず、安定した波長変換を実現できる。

【0034】また本発明は、第1方向の直線偏光を第1光軸に、第1方向と直交する第2方向の直線偏光を第2光軸にそれぞれ分離する偏光分離素子と、偏光分離素子から第2光軸に沿って進行する光の偏光方向を90度回転させる第1の90度偏光回転素子と、偏光分離素子から第1光軸に沿って進行する光および第1の90度偏光回転素子から第2光軸に沿って進行する光に関して、第1方向の直線偏光成分について波長変換を行う波長変換素子と、波長変換素子から第1光軸に沿って進行する光の偏光方向を90度回転させる第2の90度偏光回転素子と、第2の90度偏光回転素子から第1光軸に沿って進行する光および波長変換素子から第2光軸に沿って進行する光を合波する偏光合波素子と、偏光合波素子を通して光を反射させて波長変換素子に戻す反射素子を含み、波長変換素子から反射素子に向かう光と反射素子で反射して波長変換素子に戻る光の偏光方向の差が90度となるような偏光回転手段と備えることを特徴とする波長変換装置である。

【0035】本発明に従えば、波長変換素子は第1方向の直線偏光成分について波長変換可能な偏光依存性を有し、その前段に配置された偏光分離素子にポンプ光および信号光を入力すると、偏光分離素子はポンプ光および信号光に関して第1方向の直線偏光を第1光軸に、第1方向と直交する第2方向の直線偏光を第2光軸にそれぞれ分離し、第1光軸に沿って進行するポンプ光およ

び信号光は波長変換素子によって波長変換される。一方、第2光軸に沿って進行するポンプ光および信号光は、第1の90度偏光回転素子を通過すると偏光方向が第1方向と平行になり、波長変換素子によって波長変換される。

【0036】波長変換素子から第1光軸に沿って進行するポンプ光および信号光は、第2の90度偏光回転素子を通過すると偏光方向が第2方向と平行になって偏光合波素子に入り、一方、波長変換素子から第2光軸に沿って進行するポンプ光および信号光はそのまま偏光合波素子に入り、両光軸に沿った光が合波される。

【0037】次に偏光回転手段で反射すると、光の偏光方向が90度回転する。さらに偏光合波素子は、往路で第1光軸を進行したポンプ光および信号光を第2光軸に、往路で第2光軸を進行したポンプ光および信号光を第1光軸にそれぞれ分離し、第1光軸に沿って進行するポンプ光および信号光は波長変換素子によって波長変換され、そのまま偏光分離素子に入る。一方、第2光軸に沿って進行するポンプ光および信号光は、第2の90度偏光回転素子を通過すると偏光方向が第1方向と平行になり、波長変換素子によって波長変換され、さらに第1の90度偏光回転素子を通過すると偏光方向が第2方向と平行になって偏光分離素子に入る。両光軸に沿って進行するポンプ光および信号光は偏光分離素子によって合波される。その結果、第1方向成分および第2方向成分は往路および復路で波長変換されることになり、波長変換された出力光の合成強度は一定になり、信号光の偏光状態に依存せず、安定した波長変換を実現できる。

【0038】また本発明は、第1方向の直線偏光を第1光軸に、第1方向と直交する第2方向の直線偏光を第2光軸にそれぞれ分離する偏光分離素子と、偏光分離素子から第1光軸に沿って進行する光に関して、第1方向の直線偏光成分について波長変換を行う第1波長変換素子と、偏光分離素子から第2光軸に沿って進行する光に関して、第2方向の直線偏光成分について波長変換を行う第2波長変換素子と、第1波長変換素子から第1光軸に沿って進行する光および第2波長変換素子から第2光軸に沿って進行する光を合波する偏光合波素子と、偏光合波素子を通して光を反射させて波長変換素子に戻す反射素子を含み、波長変換素子から反射素子に向かう光と反射素子で反射して波長変換素子に戻る光の偏光方向の差が90度となるような偏光回転手段と備えることを特徴とする波長変換装置である。

【0039】本発明に従えば、第1波長変換素子は第1方向の直線偏光成分について波長変換可能な偏光依存性を有し、第2波長変換素子は第2方向の直線偏光成分について波長変換可能な偏光依存性を有し、その前段に配置された偏光分離素子にポンプ光および信号光を入力すると、偏光分離素子はポンプ光および信号光に関して第1方向の直線偏光を第1光軸に、第1方向と直



交する第2方向の直線偏光を第2光軸にそれぞれ分離し、第1光軸に沿って進行するポンプ光および信号光は第1波長変換素子によって波長変換され、第2光軸に沿って進行するポンプ光および信号光は第2波長変換素子によって波長変換される。

【0040】第1波長変換素子から第1光軸に沿って、および第2波長変換素子から第2光軸に沿ってそれぞれ進行するポンプ光および信号光は、偏光合波素子によって合波される。

【0041】次に偏光回転手段で反射すると、光の偏光方向が90度回転する。さらに偏光合波素子は、往路で第1光軸を進行したポンプ光および信号光を第2光軸に、往路で第2光軸を進行したポンプ光および信号光を第1光軸にそれぞれ分離し、第1光軸に沿った光は第1波長変換素子によって波長変換され、第2光軸に沿った光は第2波長変換素子によって波長変換される。

【0042】第1波長変換素子から第1光軸に沿って、および第2波長変換素子から第2光軸に沿ってそれぞれ進行するポンプ光および信号光は、偏光分離素子によって合波される。その結果、第1方向成分および第2方向成分は往路および復路で波長変換されることになり、波長変換された出力光の合成強度は一定になり、信号光の偏光状態に依存せず、安定した波長変換を実現できる。

【0043】また本発明は、前記偏光回転手段が光の偏光方向を45度回転させる45度回転素子と、4.5度偏光回転素子を通して光を反射し、4.5度回転素子へ戻すための前記反転素子から成り、前記45度回転素子が前記波長変換素子と前記反射素子の間に設けられたことを特徴とする。

【0044】本発明に従えば、偏光回転手段に入射した光の偏光方向を90度回転して、波長変換素子に戻すことができる。

【0045】また本発明は、前記偏光回転手段が、前記反射素子と前記波長変換素子の間に設けられた $\lambda/4$ 板と前記反射素子とから成ることを特徴とする。

【0046】本発明に従えば、偏光回転手段に入射した光の偏光方向を90度回転して、波長変換素子に戻すこ

$$1/\lambda_L = 2/\lambda_p - 1/\lambda_s$$

【0054】次に動作について説明する。たとえば、ポンプ光としてx方向成分とy方向成分との比が1:1である直線偏光を使用する。信号光の偏光方向は時間的に変動して不確定であるとする。

【0055】ポンプ光および信号光が合波器10によって合波され、光サーキュレータ11のポート11aからポート11bを経由して、波長変換素子1を通過する。すると、ポンプ光および信号光のx方向成分は、x方向に分極した波長変換素子1によってx方向に偏光した出力光に波長変換される。ポンプ光および信号光のy方向成分は、波長変換素子1の分極方向と直交するため、波長変換されない。

とができる。

【0047】

【発明の実施の形態】図1は、本発明の第1実施形態を示す構成図である。波長変換装置は、合波器10と、光サーキュレータ11と、波長変換素子1と、ファラデーローテータ22と、反射ミラー20などで構成される。

【0048】合波器10は、ポンプ光(波長 $\lambda_p$ )が入力される入力ポート10aと、信号光(波長 $\lambda_s$ )が入力される入力ポート10bとを備え、ポンプ光および信号光を合波して同じ光軸に沿って出力する。

【0049】光サーキュレータ11は、ポート11aに入力された光をポート11bへ出力し、ポート11bに入力された光をポート11cへ出力する。

【0050】波長変換素子1, 2は、 $\text{LiNbO}_3$  (略称LN)、 $\text{LiTaO}_3$  (略称LT)、 $\text{KNbO}_3$  (略称KN)、 $\text{KTiOPO}_4$  (略称KTP)などの非線形光学材料で形成され、ここでは分極方向をコヒーレンス長の周期で交互に反転したQPM (Quasi Phase Matching: 疑似位相整合) 素子を用いた例を示す。波長変換素子1は分極方向がx方向(紙面に平行かつ光軸に垂直)と平行になるように配置される。

【0051】ファラデーローテータ22は、光の偏光方向を光軸周りで所定方向に45度回転させる。反射ミラー20は入射した光を同じ光軸上に反射する。

【0052】波長変換において非線形光学材料の変換定数 $d_{33}$ を利用した場合、波長変換素子の分極方向、ポンプ光の偏光方向および信号光の偏光方向が互いに一致したとき、波長変換された出力光(波長 $\lambda_L$ )が同一の偏光方向で発生する。

【0053】たとえば、カスケード型差周波発生を行って1.5 $\mu\text{m}$ 帯光ファイバ通信で波長変換を行う場合、波長 $\lambda_s$ はCバンド(1.53~1.56 $\mu\text{m}$ )、波長 $\lambda_L$ はLバンド(1.56~1.61 $\mu\text{m}$ )、波長 $\lambda_p$ はCバンドとLバンドの中央である1.56 $\mu\text{m}$ に設定され、ポンプ光の波長 $\lambda_p$ 、信号光の波長 $\lambda_s$ 、出力光の波長 $\lambda_L$ は、式(1)の関係が成立する。

$$\dots (1)$$

【0056】次にポンプ光および信号光、出力光がファラデーローテータ22を通過すると、各光の偏光方向が45度回転し、反射ミラー20で反射すると、再びファラデーローテータ22を通過して各光の偏光方向がさらに45度回転し、ファラデーローテータ22の入射前と比べて90度回転した後、波長変換素子1に再入力される。このときポンプ光および信号光のx方向成分はy方向に回転しているため、波長変換素子1では波長変換されず、一方、ポンプ光および信号光のy方向成分はx方向に回転しているため、波長変換素子1によって波長変換される。その結果、入力前のx方向成分は往路で波長変換され、入力前のy方向成分は復路で波長変換される

ことになる。

【 0 0 5 7 】 波長変換された出力光は、光サーキュレータ 1 1 のポート 1 1 b からポート 1 1 c を経由して取り出される。

$$I_L = (\eta_r \cdot L \cdot E_p / \sqrt{2} \cdot E_s \cdot \cos \phi)^2 + (\eta_l \cdot L \cdot E_p / \sqrt{2} \cdot E_s \cdot \sin \phi)^2 \quad \dots (2)$$

【 0 0 5 9 】 ここで波長変換素子 1 の往路と復路で同じ場所を通過するため、 $\eta_r = \eta_l$  になり、出力光の強度

$$I_L = (\eta_r \cdot L \cdot E_p \cdot E_s)^2 / 2$$

【 0 0 6 0 】 したがって、出力光の強度  $I_L$  は信号光の入射偏光角度  $\phi$  に依存せず一定になり、信号光の偏光状態が変化しても安定した波長変換を実現できる。

【 0 0 6 1 】 図 2 は、本発明の第 2 実施形態を示す構成図である。波長変換装置は、合波器 1 0 と、光サーキュレータ 1 1 と、波長変換素子 1 と、波長選択反射ミラー 2 1 と、ファラデーローテータ 2 2 と、反射ミラー 2 0 など構成される。

【 0 0 6 2 】 合波器 1 0 は、ポンプ光（波長  $\lambda_p$ ）が入力される入力ポート 1 0 a と、信号光（波長  $\lambda_s$ ）が入力される入力ポート 1 0 b とを備え、ポンプ光および信号光を合波して同じ光軸に沿って出力する。

【 0 0 6 3 】 光サーキュレータ 1 1 は、ポート 1 1 a に入力された光をポート 1 1 b へ出力し、ポート 1 1 b に入力された光をポート 1 1 c へ出力する。

【 0 0 6 4 】 波長変換素子 1 は、LN、LT、KN、KTP などの非線形光学材料で形成され、ここでは分極方向をコヒーレンス長の周期で交互に反転した QPM 素子を用いた例を示す。波長変換素子 1 は分極方向が x 方向と平行になるように配置される。

【 0 0 6 5 】 波長選択反射ミラー 2 1 は、ダイクロイック

$$1/\lambda_L = 1/\lambda_p - 1/\lambda_s$$

【 0 0 6 9 】 次に動作について説明する。たとえば、ポンプ光として x 方向の直線偏光を使用する。信号光の偏光方向は時間的に変動して不確定であるとする。

【 0 0 7 0 】 ポンプ光および信号光が合波器 1 0 によって合波され、光サーキュレータ 1 1 のポート 1 1 a からポート 1 1 b を経由して、波長変換素子 1 を通過する。すると、ポンプ光および信号光の x 方向成分は、x 方向に分極した波長変換素子 1 によって x 方向に偏光した出力光に波長変換される。ポンプ光および信号光の y 方向成分は、波長変換素子 1 の分極方向と直交するため、波長変換されない。

【 0 0 7 1 】 次に波長選択反射ミラー 2 1 は波長変換素子 1 からのポンプ光のみを反射して波長変換素子 1 に再入力し、信号光および出力光は透過する。これによって x 方向に直線偏光したポンプ光は、往路と復路で波長変換に寄与できる。

【 0 0 7 2 】 次に信号光および出力光がファラデーローテータ 2 2 を通過すると、各光の偏光方向が 45 度回転し、反射ミラー 2 0 で反射すると、再びファラデーロー

【 0 0 5 8 】 信号光の入射偏光角度  $\phi$ 、ポンプ光の電場強度  $E_p$ 、信号光の電場強度  $E_s$ 、右周り変換効率  $\eta_r$ 、左周り変換効率  $\eta_l$ 、波長変換素子 1 の光学長  $L$  を用いて、出力光の強度  $I_L$  は式 (2) で表される。

$I_L$  は式 (3) で表される。

$$\dots (3)$$

クミラー等で構成され、ポンプ光を反射し、信号光および出力光を通過する特性を有する。このとき、反射波長と透過波長とが離れているほど良好な特性が得られるため、ポンプ光は基本波長の第 2 高調波に相当する波長に設定することが好ましい。

【 0 0 6 6 】 ファラデーローテータ 2 2 は、光の偏光方向を光軸周りで所定方向に 45 度回転させる。反射ミラー 2 0 は入射した光を同じ光軸上に反射する。

【 0 0 6 7 】 波長変換において非線形光学材料の変換定数  $d_{33}$  を利用した場合、波長変換素子の分極方向、ポンプ光の偏光方向および信号光の偏光方向が互いに一致したとき、波長変換された出力光（波長  $\lambda_L$ ）が同一の偏光方向で発生する。

【 0 0 6 8 】 たとえば、単純な差周波発生を行って 1.5  $\mu\text{m}$  帯光ファイバ通信で波長変換を行う場合、波長  $\lambda_s$  は C バンド、波長  $\lambda_L$  は L バンド、波長  $\lambda_p$  は C バンドと L バンドの中央波長 1.56  $\mu\text{m}$  の半分に相当する 0.78  $\mu\text{m}$  に設定され、ポンプ光の波長  $\lambda_p$ 、信号光の波長  $\lambda_s$ 、出力光の波長  $\lambda_L$  は、式 (1A) の関係が成立する。

$$\dots (1A)$$

テータ 2 2 を通過して各光の偏光方向がさらに 45 度回転し、ファラデーローテータ 2 2 の入射前と比べて 90 度回転した後、波長選択反射ミラー 2 1 を通過して波長変換素子 1 に再入力される。このとき信号光の x 方向成分は y 方向に回転しているため、波長変換素子 1 では波長変換されず、一方、信号光の y 方向成分は x 方向に回転しているため、波長変換素子 1 によって波長変換される。その結果、入力前の x 方向成分は往路で波長変換され、入力前の y 方向成分は復路で波長変換されることになる。

【 0 0 7 3 】 波長変換された出力光は、光サーキュレータ 1 1 のポート 1 1 b からポート 1 1 c を経由して取り出される。

【 0 0 7 4 】 図 2 の構成において、カスケード型差周波発生を行うことも可能であり、波長  $\lambda_s$  は C バンド、波長  $\lambda_L$  は L バンド、波長  $\lambda_p$  は C バンドと L バンドの中央である 1.56  $\mu\text{m}$  に設定され、ポンプ光の波長  $\lambda_p$ 、信号光の波長  $\lambda_s$ 、出力光の波長  $\lambda_L$  は、式 (1) の関係が成立する。



15

$$1/\lambda_L = 2/\lambda_p - 1/\lambda_s$$

【0075】この場合、ポンプ光、信号光および出力光の波長が接近するため、波長選択反射ミラー 21 とし、より急峻な波長選択特性を有する光学素子、たとえばファイバブラッググレーティング (FBG) 等のファイバ型フィルタや狭帯域光学コーティングフィルタなどを使用することが好ましい。

$$I_L = (\eta_r \cdot L \cdot E_p \cdot E_s \cdot \cos \phi)^2 + (\eta_l \cdot L \cdot E_p \cdot E_s \cdot \sin \phi)^2$$

… (4)

【0077】ここで波長変換素子 1 の往路と復路で同じ場所を通過するため、 $\eta_r = \eta_l$  になり、出力光の強度

$$I_L = (\eta_r \cdot L \cdot E_p \cdot E_s)^2$$

【0078】したがって、出力光の強度  $I_L$  は、信号光の入射偏光角度  $\phi$  に依存せずに一定になり、信号光の偏光状態が変化しても安定した波長変換を実現できる。また、ポンプ光が往復で寄与するため、出力光の強度  $I_L$  は図 1 と比べて 2 倍になり、波長変換効率をより一層向上できる。

【0079】図 3 は、本発明の第 3 実施形態を示す構成図である。波長変換装置は、合波器 10 と、偏光分離素子 3 と、波長変換素子 1 と、偏光合波素子 4 と、90 度偏光回転素子 5、6 など構成される。

【0080】合波器 10 は、ポンプ光 (波長  $\lambda_p$ ) が入力される入力ポート 10a と、信号光 (波長  $\lambda_s$ ) が入力される入力ポート 10b とを備え、ポンプ光および信号光を合波して同じ光軸に沿って出力する。

【0081】波長変換素子 1 は、LN、LT、KN、KTP などの非線形光学材料で形成され、ここでは分極方向をコヒーレンス長の周期で交互に反転した QPM 素子を用いた例を示す。波長変換素子 1 は分極方向が x 方向と平行になるように配置される。

【0082】偏光分離素子 3 および偏光合波素子 4 は、複屈折光学結晶を結晶軸に関して斜めに切り出した結晶

$$1/\lambda_L = 2/\lambda_p - 1/\lambda_s$$

【0086】次に動作について説明する。たとえばポンプ光として偏光分離素子 3 に入射する場所で x 方向成分と y 方向成分との比が 1 : 1 となるような直線偏光、すなわち偏光分離素子 3 の主軸に対して 45 度回転した直線偏光を使用する。信号光の偏光方向は時間的に変動して不確定であるとする。

【0087】ポンプ光および信号光が合波器 10 によって合波され、偏光分離素子 3 に入射すると、ポンプ光および信号光のうち x 方向の直線偏光は光軸 Q1 に沿って分離され、x 方向に分極した波長変換素子 1 によって x 方向に偏光した出力光に波長変換され、次に 90 度偏光回転素子 6 によって y 方向の直線偏光に変換され、偏光合波素子 4 に入る。一方、偏光分離素子 3 においてポンプ光および信号光のうち y 方向の直線偏光は光軸 Q2 に沿って分離され、次に 90 度偏光回転素子 5 によって x 方向の直線偏光に変換され、波長変換素子 1 によって x

16

… (1)

【0076】ここで、信号光の入射偏光角度  $\phi$ 、ポンプ光の電場強度  $E_p$ 、信号光の電場強度  $E_s$ 、右周り変換効率  $\eta_r$ 、左周り変換効率  $\eta_l$ 、波長変換素子 1 の光学長  $L$  を用いて、ポンプ光が往復で寄与するため、出力光の強度  $I_L$  は式 (4) で表される。

$I_L$  は式 (5) で表される。

… (5)

(たとえば c 軸から 45 度方向にカットされた YVO<sub>4</sub>) 等で構成され、ビームウォークオフ効果により、入射光のうち x 方向の直線偏光を異常光 e として光軸 Q1 に、y 方向の直線偏光を常光 o として光軸 Q2 にそれぞれ分離したり、あるいは光軸 Q1 に沿って入射する x 方向の直線偏光と光軸 Q2 に沿って入射する y 方向の直線偏光とを合波する機能を有する。

【0083】90 度偏光回転素子 5、6 は、2 分の 1 波長板等で構成され、入射光の偏光方向を 90 度回転させる機能を有する。

【0084】波長変換において非線形光学材料の変換定数  $d_{33}$  を利用した場合、波長変換素子の分極方向、ポンプ光の偏光方向および信号光の偏光方向が互いに一致したとき、波長変換された出力光 (波長  $\lambda_L$ ) が同一の偏光方向で発生する。

【0085】たとえば、カスケード型差周波発生を行って、5  $\mu$ m 帯光ファイバ通信で波長変換を行う場合、波長  $\lambda_s$  は C バンド、波長  $\lambda_L$  は L バンド、波長  $\lambda_p$  は C バンドと L バンドの中央である 1.56  $\mu$ m に設定され、ポンプ光の波長  $\lambda_p$ 、信号光の波長  $\lambda_s$ 、出力光の波長  $\lambda_L$  は、式 (1) の関係が成立する。

… (1)

方向に偏光した出力光に波長変換され、偏光合波素子 4 に入る。

【0088】偏光合波素子 4 は、光軸 Q1、Q2 に沿って入射するポンプ光、信号光および出力光を合波して、同じ光軸に沿って出力する。

【0089】こうして x 方向成分は光軸 Q1 上で波長変換され、y 方向成分は光軸 Q2 上で波長変換されるため、波長変換された出力光の合成強度は一定になり、信号光の偏光状態に依存せず、安定した波長変換を実現できる。

【0090】図 4 は、本発明の第 4 実施形態を示す構成図である。波長変換装置は、合波器 10 と、偏光分離素子 3 と、波長変換素子 1、2 と、偏光合波素子 4 と、光遅延素子 7 など構成される。

【0091】合波器 10 は、ポンプ光 (波長  $\lambda_p$ ) が入力される入力ポート 10a と、信号光 (波長  $\lambda_s$ ) が入

力される入力ポート 10b とを備え、ポンプ光および信号光を合波して同じ光軸に沿って出力する。

【0092】波長変換素子 1, 2 は、LN、LT、KN、KTP などの非線形光学材料で形成され、ここでは分極方向をコヒーレンス長の周期で交互に反転した QPM 素子を用いた例を示す。波長変換素子 1 は分極方向が x 方向と平行になるように配置される。波長変換素子 2 は分極方向が y 方向と平行になるように配置される。

【0093】偏光分離素子 3 および偏光合波素子 4 は、複屈折光学結晶を結晶軸に関して斜めに切り出した結晶（たとえば c 軸から 45 度方向にカットされた YVO<sub>4</sub>）等で構成され、ビームウオークオフ効果により、入射光のうち x 方向の直線偏光を異常光 e として光軸 Q1 に、y 方向の直線偏光を常光 o として光軸 Q2 にそれぞれ分離したり、あるいは光軸 Q1 に沿って入射する x 方向の直線偏光と光軸 Q2 に沿って入射する y 方向の直線偏光とを合波する機能を有する。

【0094】光遅延素子 7 は、所定の光学長を有する透

$$1/\lambda_L = 2/\lambda_p - 1/\lambda_s$$

【0097】次に動作について説明する。たとえばポンプ光として偏光分離素子 3 に入射する場所で x 方向成分と y 方向成分との比が 1 : 1 となるような直線偏光、すなわち偏光分離素子 3 の主軸に対して 45 度回転した直線偏光を使用する。信号光の偏光方向は時間的に変動して不確定であるとする。

【0098】ポンプ光および信号光が合波器 10 によって合波され、偏光分離素子 3 に入射すると、ポンプ光および信号光のうち x 方向の直線偏光は光軸 Q1 に沿って分離され、x 方向に分極した波長変換素子 1 によって x 方向に偏光した出力光に波長変換され、偏光合波素子 4 に入る。一方、偏光分離素子 3 においてポンプ光および信号光のうち y 方向の直線偏光は光軸 Q2 に沿って分離され、y 方向に分極した波長変換素子 1 によって y 方向に偏光した出力光に波長変換され、光遅延素子 7 を経由してから偏光合波素子 4 に入る。

【0099】偏光合波素子 4 は、光軸 Q1, Q2 に沿って入射するポンプ光、信号光および出力光を合波して、同じ光軸に沿って出力する。

【0100】こうして x 方向成分は光軸 Q1 上で波長変換され、y 方向成分は光軸 Q2 上で波長変換されるため、波長変換された出力光の合成強度は一定になり、信号光の偏光状態に依存せず、安定した波長変換を実現できる。

【0101】図 5 は、本発明の第 5 実施形態を示す構成図である。波長変換装置は、合波器 10 と、光サーキュレータ 11 と、偏光分離素子 3 と、波長変換素子 1 と、反射ミラー 20 と、90 度偏光回転素子 5 と、光遅延素子 7 などで構成される。

【0102】合波器 10 は、ポンプ光（波長  $\lambda_p$ ）が入力される入力ポート 10a と、信号光（波長  $\lambda_s$ ）が入

明材料等で構成され、偏光分離素子 3 の入射面から偏光合波素子 4 の出射面までの光軸 Q1, Q2 の光学長を一致させて、光軸 Q1, Q2 に沿って発生する出力光の位相差、パルスの場合はパルス遅延時間差を解消する機能を有する。こうした位相差が実用上無視できる場合、光遅延素子 7 は省略可能である。

【0095】波長変換において非線形光学材料の変換定数 d33 を利用した場合、波長変換素子の分極方向、ポンプ光の偏光方向および信号光の偏光方向が互いに一致したとき、波長変換された出力光（波長  $\lambda_L$ ）が同一の偏光方向で発生する。

【0096】たとえば、カスケード型差周波発生を行って 1.5  $\mu$ m 帯光ファイバ通信で波長変換を行う場合、波長  $\lambda_s$  は C バンド、波長  $\lambda_L$  は L バンド、波長  $\lambda_p$  は C バンドと L バンドの中央である 1.56  $\mu$ m に設定され、ポンプ光の波長  $\lambda_p$ 、信号光の波長  $\lambda_s$ 、出力光の波長  $\lambda_L$  は、式 (1) の関係が成立する。

$$\dots (1)$$

力される入力ポート 10b とを備え、ポンプ光および信号光を合波して同じ光軸に沿って出力する。

【0103】光サーキュレータ 11 は、ポート 11a に入力された光をポート 11b へ出力し、ポート 11b に入力された光をポート 11c へ出力する。

【0104】波長変換素子 1 は、LN、LT、KN、KTP などの非線形光学材料で形成され、ここでは分極方向をコヒーレンス長の周期で交互に反転した QPM 素子を用いた例を示す。波長変換素子 1 は分極方向が x 方向と平行になるように配置される。

【0105】偏光分離素子 3 は、複屈折光学結晶を結晶軸に関して斜めに切り出した結晶（たとえば c 軸から 45 度方向にカットされた YVO<sub>4</sub>）等で構成され、ビームウオークオフ効果により、入射光のうち x 方向の直線偏光を異常光 e として光軸 Q1 に、y 方向の直線偏光を常光 o として光軸 Q2 にそれぞれ分離したり、あるいは光軸 Q1 に沿って入射する x 方向の直線偏光と光軸 Q2 に沿って入射する y 方向の直線偏光とを合波する機能を有する。

【0106】90 度偏光回転素子 5 は、2 分の 1 波長板等で構成され、入射光の偏光方向を 90 度回転させる機能を有する。

【0107】光遅延素子 7 は、所定の光学長を有する透明材料等で構成され、偏光分離素子 3 の入射面から偏光合波素子 4 の出射面までの光軸 Q1, Q2 の光学長を一致させて、光軸 Q1, Q2 に沿って発生する出力光の位相差、パルスの場合はパルス遅延時間差を解消する機能を有する。こうした位相差が実用上無視できる場合、光遅延素子 7 は省略可能である。

【0108】波長変換において非線形光学材料の変換定数 d33 を利用した場合、波長変換素子の分極方向、ポン

ブ光の偏光方向および信号光の偏光方向が互いに一致したとき、波長変換された出力光（波長 $\lambda_L$ ）が同一の偏光方向で発生する。

【0109】たとえば、カスケード型差周波発生を行って1.5 $\mu$ m帯光ファイバ通信で波長変換を行う場合、

$$1/\lambda_L = 2/\lambda_p - 1/\lambda_s$$

【0110】次に動作について説明する。たとえばポンプ光として偏光分離素子3に入射する場所でx方向成分とy方向成分との比が1:1となるような直線偏光、すなわち偏光分離素子3の主軸に対して45度回転した直線偏光を使用する。信号光の偏光方向は時間的に変動して不確定であるとする。

【0111】ポンプ光および信号光が合波器10によって合波され、光サーキュレータ11のポート11aからポート11bを経由して、偏光分離素子3に入射すると、ポンプ光および信号光のうちx方向の直線偏光は光軸Q1に沿って分離され、x方向に分極した波長変換素子1によってx方向に偏光した出力光に波長変換される。一方、偏光分離素子3においてポンプ光および信号光のうちy方向の直線偏光は光軸Q2に沿って分離され、次に90度偏光回転素子5によってx方向の直線偏光に変換され、光遅延素子7を経由した後、波長変換素子1によってx方向に偏光した出力光に波長変換される。

【0112】波長変換素子1から光軸Q1、Q2に沿ってそれぞれ進行するポンプ光、信号光および出力光は、反射ミラー20で反射すると、再び同じ波長変換素子1を通過して波長変換される。光軸Q1に沿って進行するポンプ光、信号光および出力光は、そのまま偏光分離素子3に入る。光軸Q2に沿って進行するポンプ光、信号光および出力光は、光遅延素子7を経由した後、90度偏光回転素子5によって偏光方向がy方向と平行になって偏光分離素子3に入る。

【0113】光軸Q1、Q2に沿って進行するポンプ光、信号光および出力光は偏光分離素子3によって合波される。出力光は、光サーキュレータ11のポート11bからポート11cを経由して取り出される。

【0114】こうしてx方向成分は光軸Q1上で波長変換され、y方向成分は光軸Q2上で波長変換されるため、波長変換された出力光の合成強度は一定になり、信号光の偏光状態に依存せず、安定した波長変換を実現できる。

【0115】図6は、本発明の第6実施形態を示す構成図である。波長変換装置は、合波器10と、光サーキュレータ11と、偏光分離素子3と、波長変換素子1と、反射ミラー20と、光遅延素子7などで構成される。

【0116】合波器10は、ポンプ光（波長 $\lambda_p$ ）が入

$$1/\lambda_L = 2/\lambda_p - 1/\lambda_s$$

【0123】次に動作について説明する。たとえばポンプ光として偏光分離素子3に入射する場所でx方向成分

波長 $\lambda_s$ はCバンド、波長 $\lambda_L$ はLバンド、波長 $\lambda_p$ はCバンドとLバンドの中央である1.56 $\mu$ mに設定され、ポンプ光の波長 $\lambda_p$ 、信号光の波長 $\lambda_s$ 、出力光の波長 $\lambda_L$ は、式（1）の関係が成立する。

$$\dots (1)$$

力される入力ポート10aと、信号光（波長 $\lambda_s$ ）が入力される入力ポート10bとを備え、ポンプ光および信号光を合波して同じ光軸に沿って出力する。

【0117】光サーキュレータ11は、ポート11aに入力された光をポート11bへ出力し、ポート11bに入力された光をポート11cへ出力する。

【0118】波長変換素子1、2は、LN、LT、KN、KTPなどの非線形光学材料で形成され、ここでは分極方向をコヒーレンス長の周期で交互に反転したQPM素子を用いた例を示す。波長変換素子1は分極方向がx方向と平行になるように配置される。波長変換素子2は分極方向がy方向（紙面に垂直かつ光軸に垂直）と平行になるように配置される。

【0119】偏光分離素子3は、複屈折光学結晶を結晶軸に関して斜めに切り出した結晶（たとえばc軸から45度方向にカットされたYVO<sub>4</sub>）等で構成され、ビームウォークオフ効果により、入射光のうちx方向の直線偏光を異常光eとして光軸Q1に、y方向の直線偏光を常光oとして光軸Q2にそれぞれ分離したり、あるいは光軸Q1に沿って入射するx方向の直線偏光と光軸Q2に沿って入射するy方向の直線偏光とを合波する機能を有する。

【0120】光遅延素子7は、所定の光学長を有する透明材料等で構成され、偏光分離素子3の入射面から偏光合波素子4の出射面までの光軸Q1、Q2の光学長を一致させて、光軸Q1、Q2に沿って発生する出力光の位相差、パルスの場合はパルス遅延時間差を解消する機能を有する。こうした位相差が実用上無視できる場合、光遅延素子7は省略可能である。

【0121】波長変換において非線形光学材料の変換定数d33を利用した場合、波長変換素子の分極方向、ポンプ光の偏光方向および信号光の偏光方向が互いに一致したとき、波長変換された出力光（波長 $\lambda_L$ ）が同一の偏光方向で発生する。

【0122】たとえば、カスケード型差周波発生を行って1.5 $\mu$ m帯光ファイバ通信で波長変換を行う場合、波長 $\lambda_s$ はCバンド、波長 $\lambda_L$ はLバンド、波長 $\lambda_p$ はCバンドとLバンドの中央である1.56 $\mu$ mに設定され、ポンプ光の波長 $\lambda_p$ 、信号光の波長 $\lambda_s$ 、出力光の波長 $\lambda_L$ は、式（1）の関係が成立する。

$$\dots (1)$$

とy方向成分との比が1:1となるような直線偏光、すなわち偏光分離素子3の主軸に対して45度回転した直

線偏光を使用する。信号光の偏光方向は時間的に変動して不確定であるとする。

【0124】ポンプ光および信号光が合波器10によって合波され、光サーキュレータ11のポート11aからポート11bを経由して、偏光分離素子3に入射すると、ポンプ光および信号光のうちx方向の直線偏光は光軸Q1に沿って分離され、x方向に分極した波長変換素子1によってx方向に偏光した出力光に波長変換される。一方、偏光分離素子3においてポンプ光および信号光のうちy方向の直線偏光は光軸Q2に沿って分離され、光遅延素子7を経由した後、y方向に分極した波長変換素子2によってy方向に偏光した出力光に波長変換される。

【0125】波長変換素子1から光軸Q1、Q2に沿ってそれぞれ進行するポンプ光、信号光および出力光は、反射ミラー20で反射すると、再び同じ波長変換素子1、2を通過して波長変換される。光軸Q1に沿って進行するポンプ光、信号光および出力光は、そのまま偏光分離素子3に入る。光軸Q2に沿って進行するポンプ光、信号光および出力光は、光遅延素子7を経由した後、偏光分離素子3に入る。

【0126】光軸Q1、Q2に沿って進行するポンプ光、信号光および出力光は偏光分離素子3によって合波される。出力光は、光サーキュレータ11のポート11bからポート11cを経由して取り出される。

【0127】こうしてx方向成分は光軸Q1上で波長変換され、y方向成分は光軸Q2上で波長変換されるため、波長変換された出力光の合成強度は一定になり、信号光の偏光状態に依存せず、安定した波長変換を実現できる。

【0128】図7は、本発明の第7実施形態を示す構成図である。波長変換装置は、合波器10と、光サーキュレータ11と、偏光分離素子3と、波長変換素子1と、偏光合波素子4と、ファラデーローテータ22と、反射ミラー20などで構成される。

$$1/\lambda_L = 2/\lambda_p - 1/\lambda_s$$

【0136】次に動作について説明する。たとえばポンプ光として偏光分離素子3に入射する場所でx方向成分とy方向成分との比が1:1となるような直線偏光、すなわち偏光分離素子3の主軸に対して45度回転した直線偏光を使用する。信号光の偏光方向は時間的に変動して不確定であるとする。

【0137】ポンプ光および信号光が合波器10によって合波され、光サーキュレータ11のポート11aからポート11bを経由して、偏光分離素子3に入射すると、ポンプ光および信号光のうちx方向の直線偏光は光軸Q1に沿って分離され、x方向に分極した波長変換素子1によってx方向に偏光した出力光に波長変換され、偏光合波素子4に入る。一方、偏光分離素子3においてポンプ光および信号光のうちy方向の直線偏光は光軸Q

【0129】合波器10は、ポンプ光(波長 $\lambda_p$ )が入力される入力ポート10aと、信号光(波長 $\lambda_s$ )が入力される入力ポート10bとを備え、ポンプ光および信号光を合波して同じ光軸に沿って出力する。

【0130】光サーキュレータ11は、ポート11aに輸入された光をポート11bへ出力し、ポート11bに輸入された光をポート11cへ出力する。

【0131】波長変換素子1は、LN、LT、KN、KTPなどの非線形光学材料で形成され、ここでは分極方向をコヒーレンス長の周期で交互に反転したQPM素子を用いた例を示す。波長変換素子1は分極方向がx方向と平行になるように配置される。

【0132】偏光分離素子3および偏光合波素子4は、複屈折光学結晶を結晶軸に関して斜めに切り出した結晶(たとえばc軸から45度方向にカットされたYVO<sub>4</sub>)等で構成され、ビームウオークオフ効果により、入射光のうちx方向の直線偏光を異常光eとして光軸Q1に、y方向の直線偏光を常光oとして光軸Q2にそれぞれ分離したり、あるいは光軸Q1に沿って入射するx方向の直線偏光と光軸Q2に沿って入射するy方向の直線偏光とを合波する機能を有する。

【0133】ファラデーローテータ22は、光の偏光方向を光軸周りで所定方向に45度回転させる。反射ミラー20は入射した光を同じ光軸上に反射する。

【0134】波長変換において非線形光学材料の変換定数d33を利用した場合、波長変換素子の分極方向、ポンプ光の偏光方向および信号光の偏光方向が互いに一致したとき、波長変換された出力光(波長 $\lambda_L$ )が同一の偏光方向で発生する。

【0135】たとえば、カスケード型差周波発生を行って1.5 $\mu$ m帯光ファイバ通信で波長変換を行う場合、波長 $\lambda_s$ はCバンド、波長 $\lambda_L$ はLバンド、波長 $\lambda_p$ はCバンドとLバンドの中央である1.56 $\mu$ mに設定され、ポンプ光の波長 $\lambda_p$ 、信号光の波長 $\lambda_s$ 、出力光の波長 $\lambda_L$ は、式(1)の関係が成立する。

$$\dots (1)$$

2に沿って分離され、波長変換素子1では波長変換されずに、偏光合波素子4に入る。

【0138】偏光合波素子4は、光軸Q1、Q2に沿って入射するポンプ光、信号光および出力光を合波して、同じ光軸に沿って出力する。

【0139】次にポンプ光および信号光、出力光がファラデーローテータ22を通過すると、各光の偏光方向が45度回転し、反射ミラー20で反射すると、再びファラデーローテータ22を通過して各光の偏光方向がさらに45度回転し、ファラデーローテータ22の入射前と比べて90度回転する。再び偏光合波素子4に入射すると、x方向の直線偏光は光軸Q1に沿って分離され、x方向に分極した波長変換素子1によってx方向に偏光した出力光に波長変換され、偏光分離素子3に入る。y方

向の直線偏光は光軸 Q 2 に沿って分離され、波長変換素子 1 では波長変換されずに、偏光分離素子 3 に入る。

【0140】偏光分離素子 3 は、光軸 Q 1、Q 2 に沿って入射するポンプ光、信号光および出力光を合波して、同じ光軸に沿って出力する。

【0141】波長変換された出力光は、光サーキュレータ 11 のポート 11 b からポート 11 c を経由して取り出される。

【0142】こうして入力前の x 方向成分は光軸 Q 1 → 光軸 Q 2 の順で進行して往路で波長変換され、入力前の y 方向成分は光軸 Q 2 → 光軸 Q 1 の順で進行して復路で波長変換されるため、波長変換された出力光の合成強度は一定になり、信号光の偏光状態に依存せず、安定した波長変換を実現できる。また、入力前の x 方向成分および y 方向成分が通過する光学長が一致するため、位相分散 (PMD: Polarization Mode Dispersion) の影響を防止できる。

【0143】図 8 は、本発明の第 8 実施形態を示す構成図である。波長変換装置は、合波器 10 と、光サーキュレータ 11 と、偏光分離素子 3 と、波長変換素子 1 と、偏光合波素子 4 と、90 度偏光回転素子 5、6 と、ファラデーローテータ 22 と、反射ミラー 20 などで構成される。

【0144】合波器 10 は、ポンプ光 (波長  $\lambda_p$ ) が入力される入力ポート 10 a と、信号光 (波長  $\lambda_s$ ) が入力される入力ポート 10 b とを備え、ポンプ光および信号光を合波して同じ光軸に沿って出力する。

【0145】光サーキュレータ 11 は、ポート 11 a に入力された光をポート 11 b へ出力し、ポート 11 b に入力された光をポート 11 c へ出力する。

【0146】波長変換素子 1 は、LN、LT、KN、K  
 $1/\lambda_L = 2/\lambda_p - 1/\lambda_s$

【0152】次に動作について説明する。たとえばポンプ光として偏光分離素子 3 に入射する場所で x 方向成分と y 方向成分との比が 1:1 となるような直線偏光、すなわち偏光分離素子 3 の主軸に対して 45 度回転した直線偏光を使用する。信号光の偏光方向は時間的に変動して不確定であるとする。

【0153】ポンプ光および信号光が合波器 10 によって合波され、光サーキュレータ 11 のポート 11 a からポート 11 b を経由して、偏光分離素子 3 に入射すると、ポンプ光および信号光のうち x 方向の直線偏光は光軸 Q 1 に沿って分離され、x 方向に分極した波長変換素子 1 によって x 方向に偏光した出力光に波長変換され、次に 90 度偏光回転素子 6 によって y 方向の直線偏光に変換され、偏光合波素子 4 に入る。一方、偏光分離素子 3 においてポンプ光および信号光のうち y 方向の直線偏光は光軸 Q 2 に沿って分離され、次に 90 度偏光回転素子 5 によって x 方向の直線偏光に変換され、波長変換素子 1 によって x 方向に偏光した出力光に波長変換され、

TP などの非線形光学材料で形成され、ここでは分極方向をコヒーレンス長の周期で交互に反転した QPM 素子を用いた例を示す。波長変換素子 1 は分極方向が x 方向と平行になるように配置される。

【0147】偏光分離素子 3 および偏光合波素子 4 は、複屈折光学結晶を結晶軸に関して斜めに切り出した結晶 (たとえば c 軸から 45 度方向にカットされた YVO<sub>4</sub>) 等で構成され、ビームウオークオフ効果により、入射光のうち x 方向の直線偏光を異常光 e として光軸 Q 1 に、y 方向の直線偏光を常光 o として光軸 Q 2 にそれぞれ分離したり、あるいは光軸 Q 1 に沿って入射する x 方向の直線偏光と光軸 Q 2 に沿って入射する y 方向の直線偏光とを合波する機能を有する。

【0148】90 度偏光回転素子 5、6 は、2 分の 1 波長板等で構成され、入射光の偏光方向を 90 度回転させる機能を有する。

【0149】ファラデーローテータ 22 は、光の偏光方向を光軸周りで所定方向に 45 度回転させる。反射ミラー 20 は入射した光を同じ光軸上に反射する。

【0150】波長変換において非線形光学材料の変換定数  $d_{33}$  を利用した場合、波長変換素子の分極方向、ポンプ光の偏光方向および信号光の偏光方向が互いに一致したとき、波長変換された出力光 (波長  $\lambda_L$ ) が同一の偏光方向で発生する。

【0151】たとえば、カスケード型差周波発生を行って、5  $\mu$ m 帯光ファイバ通信で波長変換を行う場合、波長  $\lambda_s$  は C バンド、波長  $\lambda_L$  は L バンド、波長  $\lambda_p$  は C バンドと L バンドの中央である 1.56  $\mu$ m に設定され、ポンプ光の波長  $\lambda_p$ 、信号光の波長  $\lambda_s$ 、出力光の波長  $\lambda_L$  は、式 (1) の関係が成立する。

$$\dots (1)$$

偏光合波素子 4 に入る。

【0154】偏光合波素子 4 は、光軸 Q 1、Q 2 に沿って入射するポンプ光、信号光および出力光を合波して、同じ光軸に沿って出力する。

【0155】次にポンプ光および信号光、出力光がファラデーローテータ 22 を通過すると、各光の偏光方向が 45 度回転し、反射ミラー 20 で反射すると、再びファラデーローテータ 22 を通過して各光の偏光方向がさらに 45 度回転し、ファラデーローテータ 22 の入射前と比べて 90 度回転する。再び偏光合波素子 4 に入射すると、x 方向の直線偏光は光軸 Q 2 に沿って分離され、x 方向に分極した波長変換素子 1 によって x 方向に偏光した出力光に波長変換され、90 度偏光回転素子 5 によって y 方向の直線偏光に変換され、偏光分離素子 3 に入る。y 方向の直線偏光は光軸 Q 1 に沿って分離され、90 度偏光回転素子 5 によって x 方向の直線偏光に変換され、波長変換素子 1 によって x 方向に偏光した出力光に波長変換され、偏光分離素子 3 に入る。

【0156】偏光分離素子3は、光軸Q1、Q2に沿って入射するポンプ光、信号光および出力光を合波して、同じ光軸に沿って出力する。

【0157】波長変換された出力光は、光サーキュレータ11のポート11bからポート11cを経由して取り出される。

【0158】こうして入力前のx方向成分は光軸Q1→光軸Q2の順で進行して往路で波長変換され、入力前のy方向成分は光軸Q2→光軸Q1の順で進行して復路で波長変換されるため、波長変換された出力光の合成強度は一定になり、信号光の偏光状態に依存せず、安定した波長変換を実現できる。また、入力前のx方向成分およびy方向成分が通過する光学長も一致するため、位相分散(PMD:Polarization Mode Dispersion)の影響を防止できる。

【0159】図9は、本発明の第9実施形態を示す構成図である。波長変換装置は、合波器10と、光サーキュレータ11と、偏光分離素子3と、波長変換素子1、2と、偏光合波素子4と、ファラデーローテータ22と、反射ミラー20などで構成される。

【0160】合波器10は、ポンプ光(波長 $\lambda_p$ )が入力される入力ポート10aと、信号光(波長 $\lambda_s$ )が入力される入力ポート10bとを備え、ポンプ光および信号光を合波して同じ光軸に沿って出力する。

【0161】光サーキュレータ11は、ポート11aに入力された光をポート11bへ出力し、ポート11bに入力された光をポート11cへ出力する。

【0162】波長変換素子1、2は、LN、LT、K  

$$1/\lambda_L = 2/\lambda_p - 1/\lambda_s$$

【0167】次に動作について説明する。たとえばポンプ光として偏光分離素子3に入射する場所でx方向成分とy方向成分との比が1:1となるような直線偏光、すなわち偏光分離素子3の主軸に対して45度回転した直線偏光を使用する。信号光の偏光方向は時間的に変動して不確定であるとする。

【0168】ポンプ光および信号光が合波器10によって合波され、光サーキュレータ11のポート11aからポート11bを経由して、偏光分離素子3に入射すると、ポンプ光および信号光のうちx方向の直線偏光は光軸Q1に沿って分離され、x方向に分極した波長変換素子1によってx方向に偏光した出力光に波長変換され、偏光合波素子4に入る。一方、偏光分離素子3においてポンプ光および信号光のうちy方向の直線偏光は光軸Q2に沿って分離され、y方向に分極した波長変換素子2によってy方向に偏光した出力光に波長変換され、偏光合波素子4に入る。

【0169】偏光合波素子4は、光軸Q1、Q2に沿って入射するポンプ光、信号光および出力光を合波して、同じ光軸に沿って出力する。

【0170】次にポンプ光および信号光、出力光がファ

N、KTPなどの非線形光学材料で形成され、ここでは分極方向をコヒーレンス長の周期で交互に反転したQPM素子を用いた例を示す。波長変換素子1は分極方向がx方向と平行になるように配置される。波長変換素子2は分極方向がy方向と平行になるように配置される。

【0163】偏光分離素子3および偏光合波素子4は、複屈折光学結晶を結晶軸に関して斜めに切り出した結晶(たとえばc軸から45度方向にカットされたYVO<sub>4</sub>)等で構成され、ビームウオークオフ効果により、入射光のうちx方向の直線偏光を異常光eとして光軸Q1に、y方向の直線偏光を常光oとして光軸Q2にそれぞれ分離したり、あるいは光軸Q1に沿って入射するx方向の直線偏光と光軸Q2に沿って入射するy方向の直線偏光とを合波する機能を有する。

【0164】ファラデーローテータ22は、光の偏光方向を光軸周りで所定方向に45度回転させる。反射ミラー20は入射した光を同じ光軸上に反射する。

【0165】波長変換において非線形光学材料の変換定数d33を利用した場合、波長変換素子の分極方向、ポンプ光の偏光方向および信号光の偏光方向が互いに一致したとき、波長変換された出力光(波長 $\lambda_L$ )が同一の偏光方向で発生する。

【0166】たとえば、カスケード型差周波発生を行って1.5 $\mu$ m帯光ファイバ通信で波長変換を行う場合、波長 $\lambda_s$ はCバンド、波長 $\lambda_L$ はLバンド、波長 $\lambda_p$ はCバンドとLバンドの中央である1.56 $\mu$ mに設定され、ポンプ光の波長 $\lambda_p$ 、信号光の波長 $\lambda_s$ 、出力光の波長 $\lambda_L$ は、式(1)の関係が成立する。

$$\dots (1)$$

【0171】ファラデーローテータ22を通過すると、各光の偏光方向が45度回転し、反射ミラー20で反射すると、再びファラデーローテータ22を通過して各光の偏光方向がさらに45度回転し、ファラデーローテータ22の入射前と比べて90度回転する。再び偏光合波素子4に入射すると、x方向の直線偏光は光軸Q1に沿って分離され、x方向に分極した波長変換素子1によってx方向に偏光した出力光に波長変換され、偏光分離素子3に入る。y方向の直線偏光は光軸Q2に沿って分離され、波長変換素子2によってy方向に偏光した出力光に波長変換され、偏光分離素子3に入る。

【0172】波長変換された出力光は、光サーキュレータ11のポート11bからポート11cを経由して取り出される。

【0173】こうして入力前のx方向成分は光軸Q1→光軸Q2の順で進行して往路および復路で波長変換され、入力前のy方向成分は光軸Q2→光軸Q1の順で進行して往路および復路で波長変換されるため、波長変換



された出力光の合成強度は一定になり、信号光の偏光状態に依存せず、安定した波長変換を実現できる。また、入力前の x 方向成分および y 方向成分が通過する光学長も一致するため、位相分散(PMD: Polarization Mode Dispersion)の影響を防止できる。図 1～図 9 の実施の各形態における対応する各構成要素には、同一の参照符を付して示してある。

【0174】なお、図 1、図 2、図 7、図 8、図 9 においてファラデーローテータ 22 を  $\lambda/4$  板に置き換えても同様の効果が得られる。

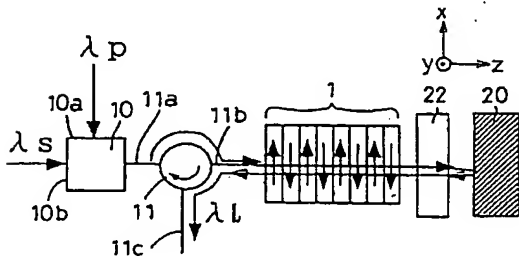
【0175】

【発明の効果】以上詳説したように本発明によれば、第 1 方向の直線偏光成分および第 1 方向と直交する第 2 方向の直線偏光成分について波長変換を行うことによって、波長変換された出力光の合成強度は一定になるため、信号光の偏光状態に依存せず、安定した波長変換を実現できる。

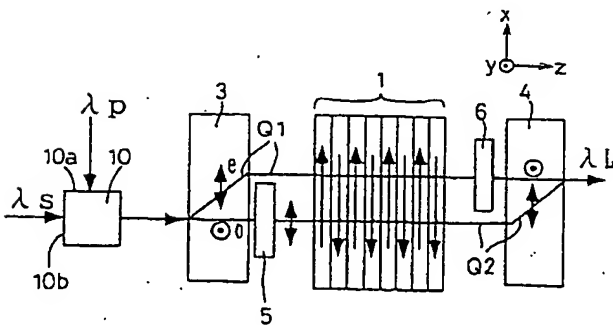
【図面の簡単な説明】

【図 1】本発明の第 1 実施形態を示す構成図である。

【図 1】



【図 3】



【図 2】本発明の第 2 実施形態を示す構成図である。

【図 3】本発明の第 3 実施形態を示す構成図である。

【図 4】本発明の第 4 実施形態を示す構成図である。

【図 5】本発明の第 5 実施形態を示す構成図である。

【図 6】本発明の第 6 実施形態を示す構成図である。

【図 7】本発明の第 7 実施形態を示す構成図である。

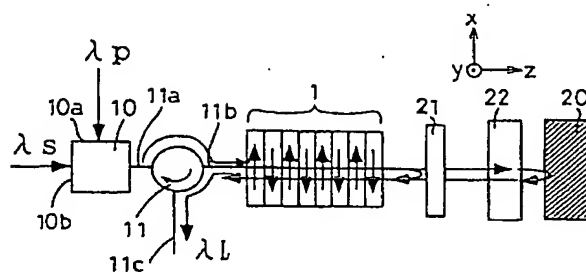
【図 8】本発明の第 8 実施形態を示す構成図である。

【図 9】本発明の第 9 実施形態を示す構成図である。

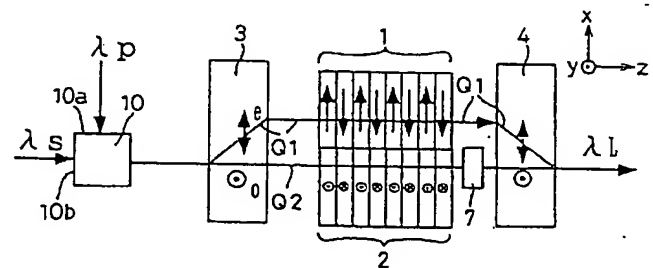
【符号の説明】

- 10 1, 2 波長変換素子  
3 偏光分離素子  
4 偏光合波素子  
5, 6 90度偏光回転素子  
7 光遅延素子  
10 合波器  
11 光サーキュレータ  
20 反射ミラー  
21 波長選択反射ミラー  
22 ファラデーローテータ

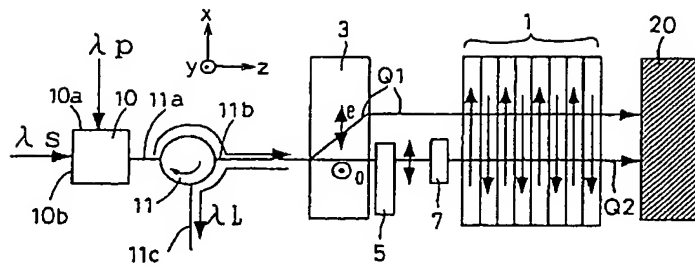
【図 2】



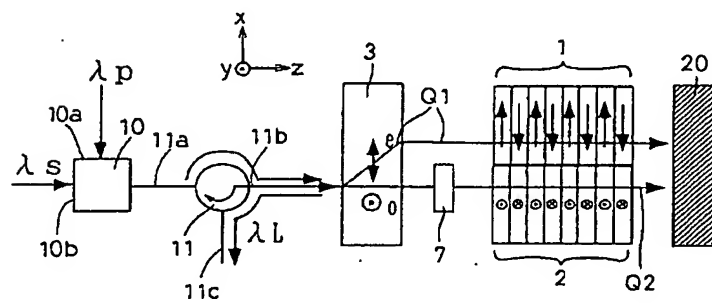
【図 4】



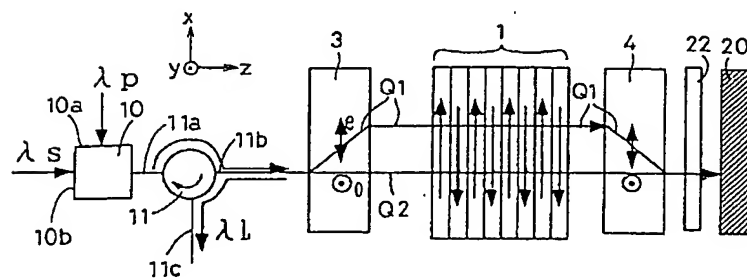
【図5】



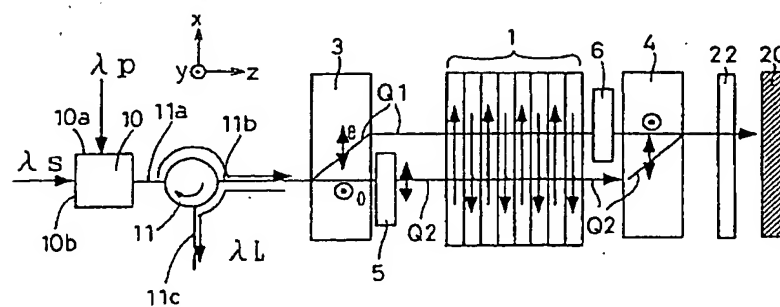
【図6】



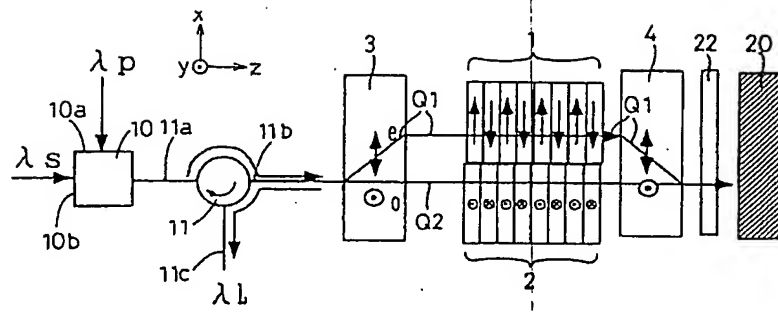
【図7】



【図8】



【図 9】



**THIS PAGE BLANK (USPTO)**